

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Roberta Fularskiego „Wpływ konwencjonalnego dłutowania oraz innowacyjnej obróbki metodą Pover Skiving na kształtowanie cech jakościowych powierzchni poddanych obróbce oraz właściwości warstwy nawęglonej kół zębatych wykonanych ze stali Pyrowear 53”**

**Promotor: dr hab. inż. Ryszard Filip, prof. PRz**

**Promotor pomocniczy: dr inż. Anna Bazan**

**1. Podstawy formalne i ogólna charakterystyka rozprawy**

Recenzję wykonano na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, wyrażone w piśmie RM-530-05-02/2022, które podpisał Przewodniczący Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna PRz dr hab. inż. Andrzej Burghardt, prof. PRz.

**2. Informacja o ocenianej rozprawie doktorskiej**

**2.1. Tytuł rozprawy, ocena układu treści, zakresu i struktury rozprawy**

Analizowana rozprawa doktorska mgr inż. Roberta Fularskiego, pod tytułem „Wpływ konwencjonalnego dłutowania oraz innowacyjnej obróbki Power Skiving na kształtowanie cech jakościowych powierzchni poddanych obróbce oraz właściwości warstwy nawęglonej kół zębatych wykonanych ze stali Pyrowear 53” została napisana na 333 stronach maszynopisu i zawiera:

Spis treści

1. Wprowadzenie,
2. Analiza literatury
3. Cel, hipoteza i zakres pracy
4. Program i metodyka badań

5. Badania na pojedynczych sztukach kół zębatych
6. Wpływ przytwierdzenia wiórów do powierzchni zębów na wybrane parametry warstwy nawęglonej
7. Analiza porównawcza kół zębatych wytworzonych w warunkach produkcyjnych metodą Fellowsa i Power Skiving
8. Podsumowanie, wnioski końcowe, elementy oryginalne pracy.
9. Literatura.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Ryszard Filip, prof. PRz, promotorem pomocniczym dr inż. Anna Bazan.

Struktura rozprawy jest typowa dla prac naukowo-badawczych. Po zdefiniowaniu problemu i tytułu rozprawy, to zawarto we wprowadzeniu, Doktorant przeprowadza analizę stanu wiedzy, następnie formułuje hipotezę badawczą, opracowuje aspekty metodyczne i zakres prac badawczych, przeprowadza zaplanowany eksperyment badawczy, który następnie analizuje, formułuje wnioski i podsumowuje rozprawę. Układ jest logiczny, kolejne etapy rozprawy są naturalnym następstwem postępu w badaniach. Z formalnego punktu widzenia rozprawa spełnia kryteria prawne.

## **2.2. Ocena celu rozprawy, hipotezy badawczej oraz zastosowanych metod pracy badawczej**

W wyniku obszernego i kompetentnie przedstawionego stanu wiedzy Doktorant stwierdza, że wiedza dotycząca wpływu obróbki Power Skiving na jakość powierzchni oraz stan warstwy wierzchniej uzębień kół zębatych jest fragmentaryczna i niewystarczająca w kontekście ewentualnego wdrożenia tej technologii do wytwarzania kół zębatych przekładni silnika lotniczego. Doktorant za bazę odniesienia przyjmuje właściwości uzębień kształtowane w procesie dłutowania metodą Fellowsa, często wykorzystywaną w praktyce przemysłowej. Przy takim założeniu Doktorant formułuje hipotezę badawczą, której istota sprowadza się do stwierdzenia, że zastosowanie metody Power Skiving do kształtowania zębów kół wykonanych ze stali Pyrowear 53, nie spowoduje pogorszenia jakości powierzchni oraz istotnych dla procesu eksploatacji właściwości warstwy wierzchniej tak wykonanych uzębień. Celem rozprawy jest wykonanie takiego cyklu badawczego, który w efekcie pozwoli na dopuszczenie technologii Power Skiving do seryjnej produkcji kół zębatych przekładni FDGS w przedsiębiorstwie Pratt&Whitney Rzeszów S.A.

Dla osiągnięcia tak sformułowanych celów Doktorant opracował szczegółowo zakres badań obejmujących badania wstępne, związane z analizą wskaźników jakości kół kształtowanych metodą Fellowsa, następnie obszerny program badań związanych z analizą

podobnych wskaźników uzębień kształtowanych metodą Power Skiving, a w kolejnym etapie przeprowadzono analizę porównawczą efektów uzyskanych w metodzie Fellowsa i Power Skiving. Dodatkowo Doktorant przeanalizował ważne zagadnienie, związane z wpływem pozostałych na powierzchni bocznej zębów wiórów, na jednorodność nawęglania, oraz w oparciu o doświadczenia laboratoryjne, przeprowadził badania przemysłowe, związane ze specyfiką produkcji seryjnej. Porównanie efektów uzyskanych w badaniach laboratoryjnych i w badaniach przemysłowych pozwoliło na uzyskanie TRL na poziomie umożliwiającym wdrożenie.

Wysoko oceniam logikę badawczą Doktoranta. Kolejność procesu badawczego, następstwo badań jako efekt wniosków z badań poprzedzających, zasługują na uznanie. Podkreślić należy bardzo duży zakres przeprowadzonych badań, badań prawidłowo prowadzonych w aspekcie metodycznym, wymagających dobrego przygotowania Autora do ich prawidłowego przeprowadzenia i interpretacji. Nie wnoszę uwag do hipotezy naukowej, tytuł rozprawy mógłby być nieco krótszy, bez szkody dla jej istoty.

### **2.3. Ocena wykorzystanego piśmiennictwa oraz opisu stanu wiedzy**

Analizowana literatura obejmuje 225 pozycji, jest to dość dużo jak na przyjęte dla rozpraw doktorskich standardy. Jest to literatura bardzo zróżnicowana. Są tam zarówno ponad 40 letnie podręczniki jak też artykuły naukowe z ostatnich kilku lat, liczne strony internetowe z pobraniem w ostatnich kilku latach, normy ISO, DIN, ASTM, normy zakładowe, także pozycje o mniejszym znaczeniu jak artykuły popularnonaukowe, wydawnictwa szkolne, dokumentacja maszynowa. Przegląd literatury, obejmujący ok. 100 stron tekstu, w tym sposób przywoływania poszczególnych pozycji, dojrzałość wyboru treści, dobre jej skorelowanie z celami rozprawy, daje ogólnie pozytywny obraz Kandydata, świadcząc o jego zaawansowanej wiedzy, umiejętności formułowania wniosków i umiejętności oceny walorów aplikacyjnych analizowanej wiedzy. Pewien niedosyt budzi brak podsumowania stanu wiedzy w kontekście celów rozprawy, zwłaszcza osobistej, ocennej, a zwłaszcza krytycznej, refleksji Kandydata na temat tego stanu. To znakomicie ułatwia formułowanie hipotez badawczych i definiowanych celów oraz zakresu rozprawy.

### **2.4. Ocena uzyskanych wyników badań oraz poziomu ich naukowej dyskusji**

Zaplanowanie i przeprowadzenie obszernego programu badań pozwoliło Doktorantowi na uzyskanie istotnych wyników zarówno w obszarze poznawczym jak i praktycznym. Ważniejsze efekty uzyskane przez Doktoranta są następujące:

- A. Uzyskanie efektów badawczych umożliwiających dobór technologicznych parametrów obróbki metodą Power Skiving przy których uzyskano około 4-krotną redukcję czasu obróbki kół w stosunku do metody Fellowsa.
- B. Opracowanie i ocena, na podstawie obszernych badań, wpływu obróbki Power Skiving na parametry kształtowo-wymiarowe wykonywanych kół, topografię powierzchni poddanych obróbce, mikrostrukturę warstwy wierzchniej oraz stan kształtowanych podczas obróbki naprężeń własnych.
- C. Interesująca analiza zjawiska zgrzewania wiórów do powierzchni obrobionych oraz wpływu tego zjawiska na efekty procesu nawęglania.
- D. Przeprowadzenie prób przemysłowych i statystyczne opracowanie wyników stanowiących podstawę do wdrożenia tej technologii w produkcji seryjnej.

Należy podkreślić, że w każdym obszarze badań niezbędnych do uzyskania efektów przedstawionych w pkt A-D, Doktorant wykazał się kompetencjami, a dyskusja wyników jest na dobrym poziomie.

### **2.5. Ocena wartości praktycznej uzyskanych wyników**

Pozytywna ocena uzyskanych wyników praktycznych wynika wprost z faktu wdrożenia metody Power Skiving do produkcji seryjnej kół przekładni lotniczej FDGS. Najważniejsze efekty praktyczne rozprawy Doktorant przedstawił w pkt 1-10 w podrozdziale 8.2. Dotyczą one pewnych szczegółów technologicznych związanych z porównaniem technologii Fellowsa i Power Skiving. Wysoko oceniam wartość praktyczną uzyskanych wyników.

### **2.6. Uwagi do ocenianej rozprawy**

#### **2.6.1. Uwagi i sugestie dotyczące otrzymanych rezultatów**

Pewne elementy dotyczące interpretacji otrzymanych wyników, ze względu na znaczenie faktu wdrożenia technologii do produkcji seryjnej, wymagają dodatkowych wyjaśnień Doktoranta podczas publicznej obrony:

- A. Doktorant kilkakrotnie w tekście zamieszcza zdanie „trzeba w tym miejscu pamiętać, że obszar stopy zęba jest rejonem, w którym ze względu na geometrię koła zębatego, jego sąsiadujących zębów, kinetyka dyfuzji do warstwy wierzchniej nie jest tak efektywna jak dla obszarów zlokalizowanych w pobliżu np. koła podziałowego”. Jak wiadomo kinetykę dyfuzji opisują prawa Ficka, z których wynika, że szybkość dyfuzji zależy od stężenia czynnika dyfundującego, temperatury i czasu, dodatkowo należy także uwzględnić masę cząsteczkową, stan skupienia materii, rodzaj ośrodka. Który z

tych czynników wpływał inaczej na kinetykę procesu dyfuzji w obszarze średnicy stóp i średnicy podziałowej zęba?

- B. Jak Doktorant ocenia różnicę stopnia zgniotu (odkształcenia plastycznego) w obszarze średnicy stóp i średnicy podziałowej (rys. 5.51 i 5.52), w tym dla kół wykonanych metodą Fellowsa i metodą Power Skiving?. Jeśli taka różnica występuje, to czy zdaniem Doktoranta mogło to mieć wpływ na kinetykę dyfuzji w kontekście mechanizmu dyfuzji wakancyjnej i międzywęzłowej?
- C. Jeśli występowała wymieniona w pkt B różnica stopnia odkształcenia plastycznego w obszarze stóp i średnicy podziałowej, to czy mogło to mieć wpływ na stwierdzoną różnicę w twardości w rejonie średnicy podziałowej i średnicy stóp po nawęglaniu i hartowaniu?
- D. Jak Doktorant tłumaczy wyniki analizy dyfrakcyjnej zawarte w tab. 5.17, a zwłaszcza istotne różnice w wartościach naprężeń własnych w warstwie wierzchniej kół kształtowanych metodą Fellowsa i Power Skiving, jak ocenia te wyniki w kontekście eksploatacji kół w silniku lotniczym?
- E. Doktorant nie prowadził porównawczych badań zmęczeniowych kół wykonanych metodą Fellowsa i Power Skiving, ale czy w oparciu o uwagi sformułowane w pkt A - D Doktorant oczekuje różnic w ocenie tej wytrzymałości?

### **2.6.2. Uwagi redakcyjne**

Rozprawa, w ocenie ogólnej napisana jest bardzo starannie, bardzo mało występuje tzw. „literówek”, pomijam je jako nieistotne dla wartości rozprawy, zdania są logiczne, Doktorant stosuje poprawną terminologię techniczną. Na niektóre jednak usterki, zgodnie z warunkami umowy, zwracam uwagę:

- Doktorant używa określenia „pomiar naprężeń” (np. str. 80), w rzeczywistości mierzymy odkształcenia,
- w tekście (np. str. 89) występuje określenie „naprężenia wewnętrzne”, należy używać określenia „naprężenia własne”, ewentualnie „resztkowe”, wszystkie naprężenia są „wewnętrzne”, niezależnie czy pochodzą od aktualnie przyłożonego obciążenia, czy są pozostałymi po ustaniu przyczyn je wywołujących, np., dyfuzji, zmian struktury, odkształcenia plastycznego,
- Autor używa określenia „wysokie właściwości mechaniczne”, właściwości nie mogą być wysokie czy niskie, mogą być np. korzystne dla zdefiniowanego kryterium, jakkolwiek ocena właściwości musi odnosić się do zdefiniowanego kryterium,

- należy unikać określenia „efektywny”, jeżeli nie zdefiniujemy kryterium efektywności, proces może być efektywny np. z punktu widzenia oczekiwanego stanu warstwy wierzchniej, ale zupełnie nieefektywny z punktu widzenia kosztów procesu, Doktorant używa tego określenia w hipotezie badawczej,

- w tab. 4.1 Doktorant stosuje błędnie jednostkę mocy (kN) oraz prędkość posuwu (mm/min) określa posuwem.

*Chciałbym także zauważyć, że według art. 187p4 Ustawy o szkolnictwie wyższym i nauce: „Do rozprawy doktorskiej dołącza się streszczenie w języku angielskim, a do rozprawy doktorskiej przygotowanej w języku obcym również streszczenie w języku polskim. W przypadku gdy rozprawa doktorska nie jest pracą pisemną, dołącza się opis w językach polskim i angielskim”.*

Wymaganego ustawą streszczenia brakuje w rozprawie, ale może być ono dołączone oddzielnie, jak osobiście rozumiem treść art. 187.p4. W tym kontekście zakładam, że takie streszczenie zostało przez Doktoranta złożone i znajduje się w dokumentacji postępowania doktorskiego w Radzie Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej. Proszę Doktoranta o potwierdzenie tego faktu.

### **3. Ocena osiągnięć Doktoranta w aspekcie wymagań prawnych (wiedza, umiejętność prowadzenia badań, redagowanie prac , naukowa dyskusja wyników)**

Biorąc pod uwagę ocenę rozprawy w kontekście spełniania wymagań w rozumieniu Art. 186 pkt 1-5 oraz 187 pkt 1- 4 Ustawy o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia z dnia 20 lipca 2018 roku, Dziennik Ustaw RP z dnia 30 sierpnia 2018 roku, poz. 1668, jak też standardy zawarte w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku, Dziennik Ustaw RP z 30 stycznia 2018 roku, poz, 261, w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora, należy stwierdzić, że Doktorant spełnił te wymagania poprzez:

1. Skuteczne i na dobrym poziomie, w aspekcie wymagań prawnych, rozwiązanie problemu naukowo-technicznego, o charakterze analityczno-eksperymentalnym, poprzez autorskie opracowanie i przeprowadzenie badań porównawczych kół zębatych przeznaczonych do eksploatacji w przekładni FDGS silnika lotniczego, wykonanych metodą dłutowania Fellowsa oraz metodą Power Skiving. Wyniki tych badań stały się podstawą do podjęcia decyzji o wdrożeniu metody Power Skiving do produkcji seryjnej.

2. Doktorant wykazał się adekwatną do standardów przewodu doktorskiego wiedzą ogólną i szczegółową, odpowiadającą specyfice dyscypliny w której ubiega się o stopień naukowy doktora. Wiedza ta zawarta jest w obszernym omówieniu, na podstawie 225 pozycji literatury, stanu wiedzy w interesującym Doktoranta obszarze, kompetentnie cytowanych źródeł, także w ocenie i interpretacji uzyskanych wyników, logice wywodów, wykorzystaniu naukowych podstaw wnioskowania i formułowaniu wniosków.
3. Doktorant wykazał, że potrafi samodzielnie formułować zadania badawcze, logicznie zaplanować eksperyment, wykorzystywać nowoczesną aparaturę do badań naukowych oraz rozwiązywać złożone problemy w problematyce doskonalenia procesów wytwarzania.

Z poznawczego i praktycznego punktów widzenia na uwagę zasługują przede wszystkim następujące osiągnięcia Doktoranta:

- A. Wdrożenie technologii Power Skiving do produkcji kół daszkowych przekładni FDGS silnika lotniczego, było to celem głównym realizowanej rozprawy.
- B. Dostosowanie obrabiarki Gleason 600PS do realizacji celów rozprawy, w tym doboru technologicznych parametrów obróbki metodą Power Skiving.
- C. Profesjonalnie zaplanowany i przeprowadzony cykl badań obejmujących badania metalograficzne, analizę naprężeń własnych, specjalistyczne pomiary dokładności uzębień, badania twardości i cech topograficznych powierzchni bocznych zębów.
- D. Obok osiągnięcia celu wdrożeniowego za ważny efekt rozprawy uważam cenne uporządkowanie wiedzy na temat technologii Power Skiving, wprowadzie od dawna znanej, ale nie stosowanej w praktyce przemysłowej.

Analizując wiedzę zawartą w rozprawie doktorskiej oraz cytowanym piśmiennictwie nie ulega wątpliwości, że jest ona dobrze skorelowana z istotą dyscypliny inżynieria mechaniczna. W efekcie całościowego spojrzenia na ocenianą rozprawę doktorską uważam, że stanowi ona wartościowe opracowanie o charakterze naukowym i aplikacyjnym, wzbogaca wiedzę Doktoranta w ważnym obszarze inżynierii mechanicznej, jest też dowodem na innowacyjne spojrzenie Autora na problemy nowoczesnego wytwarzania.

#### **4. Wniosek o wyróżnienie i jego uzasadnienie**

Pomimo przedstawionych do dyskusji uwag i sugestii, nie obniżają one w istotnym stopniu wartości ocenianej rozprawy, wnioskuję o jej wyróżnienie. Wniosek uzasadniam następująco:

1. Przeprowadzony cykl badań i uzyskane efekty umożliwiły podjęcie decyzji o wdrożeniu technologii Power Skiving do seryjnej produkcji kół daszkowych przekładni silnika lotniczego. Wdrożenie technologii w przemyśle lotniczym, zwłaszcza do elementów bezpośrednio wpływających na bezpieczeństwo lotu, jest z samego założenia trudnym i ważnym osiągnięciem.
2. Przeprowadzenie bardzo obszernego i pracochłonnego programu badań wymagających zaawansowanej wiedzy i kompetencji, pomimo wdrożeniowego charakteru rozprawy, charakteryzuje się ona także dobrym poziomem naukowym.
3. Doktorant wykazał zaawansowane umiejętności w zakresie racjonalnego planowania eksperymentów, posługiwania się nowoczesną aparaturą pomiarową oraz implementacji naukowych podstaw teorii wnioskowania.
4. Opracowanie tej rozprawy jest ważnym elementem syntezy wiedzy na temat aplikacyjnych aspektów technologii Power Skiving do produkcji kół zębatych.

#### **5. Wniosek końcowy**

Przeprowadzone prace studialne, analiza teoretyczna, i przeprowadzone, według własnych koncepcji, badania przemysłowe, w odczuciu opiniującego stanowią zamkniętą i logiczną część ważnej problematyki w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Uważam, że wykonanie tej pracy wzbogaca wiedzę Doktoranta o złożonych zjawiskach w procesie implementacji opracowanych naukowo narzędzi doskonalenia procesów wytwarzania do praktyki gospodarczej. Jest także ważnym opracowaniem dla praktyki przemysłowej.

Analizowana rozprawa doktorska, w przekonaniu opiniującego, w dobrym stopniu spełnia wymagania w rozumieniu Art. 186 pkt 1-5 oraz 187 pkt 1-4 Ustawy o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku, Dziennik Ustaw RP z dnia 30 sierpnia 2018 roku, poz. 1668, jak też standardy zawarte w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku, Dziennik Ustaw RP z 30 stycznia 2018 roku, poz. 261, w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Roberta Fularskiego do jej publicznej obrony w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*.

